

С. В. Жила^{1✉}, Е. А. Артемихина¹, И. В. Фуряев¹

Пирофитность сосны (*Pinus sylvestris* L.): исследование адаптивных реакций древесины на лесные пожары в Прибайкалье методом термогравиметрии

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: getgain@mail.ru

Аннотация. Методом термогравиметрии исследованы адаптивные реакции древесины *Pinus sylvestris* L. на повторные лесные пожары в Южной Сибири. Выполнен термогравиметрический анализ (ТГ/ДТГ) образцов древесины из годовых колец в годы пожара (F), предшествующий (PF) и последующий (PTF) периоды. Выявлено, что пирогенное воздействие инициирует устойчивые изменения лигнин-углеводной матрицы: снижается содержание целлюлозы, и повышается содержание гемицеллюлоз и лигнина. При этом, термическая стабильность целлюлозы и лигнина в образцах со следами пожара повышается. Наиболее выраженные сдвиги зафиксированы для пожаров высокой интенсивности (1915, 1950 гг.). Показано, что парные соотношения лигнин/целлюлоза и лигнин/гемицеллюлоза выступают маркерами восстановления после теплового шока. Полученные данные подтверждают наличие у *P. sylvestris* механизмов для физиолого-биохимических адаптаций, позволяющих данному виду сохранять жизнеспособность и восстанавливать камбиальную активность после высокотемпературного стресса. Интеграция дендрохронологического и термохимического подходов рекомендуется для прогноза устойчивости лесов при меняющихся режимах пожаров.

Ключевые слова: изменения климата, лесной пожар, сосна обыкновенная, пирофитность, годовые кольца, термогравиметрия

S. V. Zhila^{1✉}, E. A. Artemikhina¹, I. V. Furyaev¹

Pyrophytic properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): Study of adaptive responses of wood to forest fires in the Baikal region using thermogravimetry

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: getgain@mail.ru

Abstract. The adaptive responses of *Pinus sylvestris* L. wood to repeated forest fires in Southern Siberia were studied using thermogravimetry. Thermogravimetric analysis (TG/DTG) of wood samples from annual rings was performed in the years of fire (F), preceding (PF), and following (PTF) periods. Pyrogenic exposure was found to initiate persistent changes in the lignin-carbohydrate matrix: the content of cellulose decreases, and the proportion of lignin and cellulose content increases. At the same time, the thermal stability of cellulose and lignin in samples with traces of fire increases. The most pronounced shifts were recorded for high-intensity fires (1915, 1950). Paired lignin/cellulose and lignin/hemicellulose ratios are shown to act as markers of recovery after heat shock. The data obtained confirm the presence of physiological and biochemical adaptation mechanisms in *P. sylvestris*, allowing this species to maintain viability and restore cambial activity after high-temperature stress. The integration of dendrochronological and thermochemical approaches is recommended for predicting forest resilience under changing fire regimes.

Keywords: climate change, forest fire, Scots pine, pyrophytic properties, tree rings, thermogravimetry

Введение

Современный период лесообразовательных процессов обнажает актуальную проблему устойчивости и продуктивности лесных экосистем, сопряжённую с ролью лесов в глобальных экологических процессах [1-3]. Сосновые леса занимают значительную долю хвойных массивов Сибири и служат основной породой для лесной промышленности [4, 5]. Будущие климатические условия будут более благоприятны для пожаров, поэтому управление лесными экосистемами необходимо для смягчения последствий растущей частоты нарушений [3, 6, 7]. Частота пожаров и средний межпожарный интервал определяют долговременную динамику бореальных лесов и их устойчивость к пирогенному воздействию [8].

Вопросы устойчивости древесных растений к пирогенному воздействию рассматривались многими исследователями [9-14]. Так, в отечественных исследованиях, у молодых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в ходе экспериментального низового пожара, количество и размер поздних трахеид уменьшились, а годовые кольца стали уже, чем до пирогенного воздействия [9]. В ходе исследований у североамериканских авторов огонь оказал значительное влияние на структуру смоляных каналов сосны желтой (*Pinus ponderosa* Dougl ex P. & C. Laws.) [14]. Европейские авторы отметили замедление роста и снижение водного потенциала после пожара [10]. В более ранних исследованиях сосны калабрийской (*Pinus brutia* Ten.) отмечено повышение уровня неструктурных белков и аскорбиновой кислоты в хвое после пирогенного воздействия, при этом содержание растворимых сахаров и неструктурных белков во флоэме снизилось [13]. Однако эти данные не объясняют процессы в годовых кольцах в год пожара и после него. Актуально изучение пород, сохраняющих жизнедеятельность после пирогенного воздействия [9, 10]. К таким относится *P. sylvestris*, способная сохранять и расширять ареал благодаря пиропитным свойствам [15-17]. Пиропитность – способность «противостоять» огню (огнестойкость, пожароустойчивость насаждений, возобновление на горячих). Эти адаптации – следствие длительной эволюции в условиях континентального климата с частыми пожарами [15, 16].

Традиционные дендрохронологические методы, базирующиеся на анализе ширины годовых колец и визуальной регистрации пожарных подсушин, представляют собой наиболее точный и апробированный инструмент датирования лесных пожаров [11, 12, 18, 19]. Дальнейшим развитием инструментария экологических реконструкций стал дендробиохимический подход [20, 21]. Применение дендробиохимического подхода для изучения деревьев, неоднократно подвергавшихся воздействию пожаров позволяет количественно оценить физиологический ответ дерева на термический стресс [22].

Исходя из вышесказанного, цель работы – на примере сосны обыкновенной в Южной Сибири (зоне высокой пожарной активности) оценить влияние пожаров на физико-химические и биохимические процессы в нарушенных лесных экосистемах для совершенствования лесоправления.

Методы и материалы

Объекты исследования – сосняки на сухих бедных почвах в Хоринском лесничестве Республики Бурятия (водоохранная зона озера Байкал, Забайкальский горно-таёжный район). Отбор образцов проведён в сосновом насаждении, неоднократно пройденном пожарами. Для построения хронологии пожаров отобраны спилы (более 30 шт.) с деревьев, имеющих пожарные подсушины. Ширину годовичных колец измеряли на приборе LINTAB, датировку пожаров проводили по методике T.W. Swetnam [18]. Анализ истории пожаров выполнен с помощью программы FNAES [23], основанной на [24], которая позволяет анализировать пространственно-временную изменчивость динамики пожаров по пожарным подсушинам на спилах. Данные о пожароопасных годах сопоставлены с исследованием E.R. Bigio [25].

Для термогравиметрического анализа отобраны годовичные кольца с пожарными подсушинами: в годы пожаров (F), предшествующие (PF) и последующие (PTF) годы. Проанализированы образцы за 1828, 1837, 1893, 1915, 1950, 1972, 1998, 2007 гг. Древесину годовичных колец измельчали в порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). После кондиционирования до равновесной влажности ~65 % проводили термический анализ. Термогравиметрию (ТГ) выполняли на анализаторе TG 209 F1 Libra (Netzsch, Германия).

Статистические тесты проведены в R (v.4.4.1), значимость принята при $p < 0,05$. Для визуализации использовали пакеты «Tidyverse», «Permiso».

Исследование выполнено на термомикровесах TG 209 F1 Libra Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Результаты

В ходе анализа пространственно-временной изменчивости динамики пожаров с использованием пожарных подсушин в исследуемых насаждениях был определен средний межпожарный интервал, который составил 23,7 лет.

На рисунке 1 представлены термогравиметрические (ТГ) кривые и производные ТГ-кривых (ДТГ) для образцов 1892 (PF), 1893 (F) и 1894 (PTF), а также ТГ-кривые для контрольного образца, полученные в результате ТГ-анализа древесины в окислительной среде.

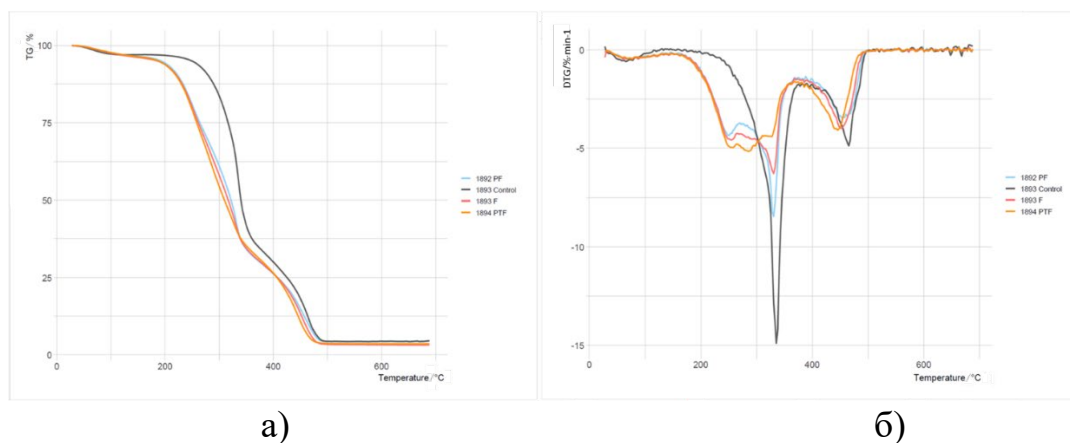


Рис. 1. ТГ (а) и ДТГ (б) кривые термодеструкции древесинного вещества из годовичных колец *P. sylvestris* 1892–1894 гг.

Потеря массы на кривых ТГ ниже 180 °С объясняется испарением воды и летучих соединений (Δm_1) [26]. В диапазоне 180–700 °С образцы *P. sylvestris*, подвергшиеся воздействию термического шока, показали три пика на кривых ДТГ, контрольные – два пика. Первая стадия (обугливание, 230–375 °С) включает разложение гемицеллюлозы (Δm_2) и целлюлозы (Δm_3) с образованием CO_2 , CO , CH_4 и др. [27]. Вторая стадия (прокаливание, 400–505 °С) включает разложение лигнина (Δm_4) и окисление угля [28]. Деградация целлюлозы (до 380 °С) проявлялась чётким пиком на ДТГ. Скорость потери массы целлюлозы в контрольных образцах практически не изменялась с ростом дерева, а в образцах, подвергнутых огню, увеличивалась. Максимальная скорость потери массы была выше для контрольных образцов (15,2–16,8 %·мин), для обожжённых – от 8,1 до 17,1 %·мин.

Третий этап – деградация остаточного лигнина и окисление угля (Δm_4). В образцах, подвергнутых огню, скорость потери массы на этом этапе с возрастом деревьев увеличивалась (в контроле – без изменений). Термическая стабильность лигнина в контрольных образцах смещалась к более низким температурам, в обожжённых – к более высоким, что указывает на более медленное разложение термически стабильного лигнина после пожара.

Обсуждение

Данные указывают на изменение термических характеристик годовичных колец *P. sylvestris* в 1915 и 1950 гг. (годы наиболее разрушительных пожаров в Сибири). Парные соотношения гемицеллюлоза/вода, целлюлоза/вода и лигнин/вода достигли максимумов, содержание влаги в клеточных стенках резко возросло за счёт конденсации водяного пара [10]. В эти годы, по литературным данным, температура у ствола могла достигать 1000 °С [29]. Соотношения лигнин/гемицеллюлоза и лигнин/целлюлоза изменились: количество целлюлозы уменьшилось, а содержание гемицеллюлозы, лигнина и воды увеличилось вследствие термического шока [30], что указывает на способность сосны сохранять жизнеспособность даже после пожаров высокой интенсивности.

Стресс от высокой температуры и дефицита воды запускает биохимические сдвиги. Синергетическое воздействие снижает синтез целлюлозы (через угнетение экспрессии генов и активности ферментов) [29] и изменяет синтез лигнина (вероятно, увеличивая его за счёт мономеров). Повышенное содержание гемицеллюлоз в образцах с подсушинами возможно, связано с арабиногалактаном типа II, который укрепляет клеточную стенку и способствует термотолерантности. Несмотря на снижение содержания целлюлозы, ее термическая стабильность у деревьев со пожарными подсушинами, повышается, что соответствует приобретению термотолерантности с участием ферментов ремоделирования клеточной стенки. Повышение термостойкости лигнина и целлюлозы, а также увеличение содержания гемицеллюлоз открывают возможности для изучения пиропитного роста сосны.

Заключение

Результаты дают представление о физиологических и биохимических реакциях *P. sylvestris* на повторные пожары в Байкальском регионе. Средний межпожарный интервал (23,7 года) подтверждает историческую распространённость пожаров. Термогравиметрия выявила модификации в термическом поведении гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина между подвергшемся термическому шоку образцами сосны и контрольными образцами, что указывает на адаптивные механизмы сосны. Анализ трансформации полимеров после пяти пожаров показал, что повторяющийся термический шок снижает содержание целлюлозы, повышают содержание лигнина и гемицеллюлоз. Несмотря на снижение целлюлозы, её термическая стабильность, как и стабильность лигнина, возрастает. Кроме того, выявлено, что у деревьев, испытавших термический шок, выше содержание гемицеллюлоз, что по-нашему мнению свидетельствует о способности вида восстанавливать камбий и регенерировать ткани после пожаров, что подразумевает под собой эволюционную адаптацию. Исследование углубляет понимание механизмов адаптации: модуляция динамики лигнина и углеводов обеспечивает экологический успех сосны в пожароопасных районах. Растущая частота пожаров в Сибири требует активных стратегий управления, а интеграция дендрохронологических и биохимических подходов даёт основу для прогноза устойчивости лесов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках двух государственных заданий Института леса ФИЦ КНЦ СО РАН - FWES-2024-0007 и FWES-2024-0028

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова Г.А., Иванов А.В. Пожары в сосновых лесах Средней Сибири. – Новосибирск : Наука, 2015. – 238 с.
2. Брюханов А.В., Панов А.В., Пономарев Е.И., Сиденко Н.В. Пирогенное влияние на основные лесобразующие породы Приенисейской Сибири // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 17, № 4. – С. 26-40. – DOI: 10.21455/GPB2018.4-2.

3. Furyaev V.V., Vaganov E.A., Tchebakova N.M., Valendik E.N. Effects of fire and climate on successions and structural changes in the Siberian boreal forest // *Eurasian Journal of Forest Research*. – 2001. – Vol. 2. – P. 1-15.
4. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. – М. : Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 288 с.
5. Гребенюк А.Л., Матвеева А.Г. Возрастная структура и состав высокобонитетных сосновых лесов Прибайкалья // *Сибирский лесной журнал*. – 2025. – № 3. – С. 45-55. – DOI: 10.15372/sjfs20250305.
6. McLauchlan K.K., Higuera P.E., Miesel J., Rogers B.M., Schweitzer J., Shuman J.K., Tepley A.J. Fire as a Fundamental Ecological Process: Research Advances and Frontiers // *Journal of Ecology*. – 2020. – Vol. 108. – P. 2047-2066. – DOI: 10.1111/1365-2745.13403.
7. Stephens S.L., Westerling A.L., Hurteau M.D., Peery M.Z., Schultz C.A., Thompson S. Fire and Climate Change: Conserving Seasonally Dry Forests Is Still Possible // *Frontiers in Ecology and the Environment*. – 2020. – Vol. 18. – P. 354-356. – DOI: 10.1002/fee.2218.
8. Иванова Г.А. Зонально-экологические особенности лесных пожаров в сосняках Средней Сибири : дис. ... д-ра биол. наук : 06.03.03. – Красноярск, 2005. – 405 с.
9. Sudachkova N.E., Romanova L.I., Astrakhanseva N.V., Novoselova M.V., Kosov I.V. Stress reactions of Scots pine trees to injuring by ground fire // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2016. – Vol. 9. – P. 608-616. – DOI: 10.1134/S1995425516050152.
10. Bär A., Michaletz S.T., Mayr S. Fire effects on tree physiology // *New Phytologist*. – 2019. – Vol. 223. – P. 1728-1741. DOI: 10.1111/nph.15871.
11. Kirdyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // *Environmental Research Letters*. – 2020. – Vol. 15. – Article 034061. – DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
12. Knorre A.A., Siegwolf R.T., Kirdyanov A.V., Saurer M., Churakova (Sidorova) O.V., Prokushkin A.S. Fire as a major factor in dynamics of tree-growth and stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ variations in larch in the permafrost zone // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – Article 13050725. – DOI: 10.3390/f13050725.
13. Alexou M., Dimitrakopoulos A. Early physiological consequences of fire as an abiotic stressor in metabolic source and sink of young Brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) // *Tree Physiology*. – 2014. – Vol. 34. – P. 1388-1398. – DOI: 10.1093/treephys/tpu098.
14. Perrakis D.D., Agee J.K. Seasonal fire effects on mixed-conifer forest structure and ponderosa pine resin properties // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2006. – Vol. 36. – P. 238-253. – DOI: 10.1139/x05-212.
15. Санников С.Н., Санникова Н.С. Эволюционные аспекты пирозкологии светлохвойных пород // *Лесоведение*. – 2009. – № 3. – С. 3-10.
16. Фуряев В.В., Фуряев Е.А. Пирозкологические свойства сосны обыкновенной в Средней Сибири // *Хвойные бореальной зоны*. – 2008. – Т. XXV, № 1-2. – С. 103-108.
17. Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на пожарах в лесостепи Западной Сибири // *Сибирский лесной журнал*. – 2019. – № 5. – С. 22-29. – DOI: 10.15372/SJFS20190503.
18. Swetnam T.W., Baisan C.H. Historical Fire Regime Patterns in the Southwestern United States since AD 1700 // *Fire Effects in Southwestern Forests: Proceedings of the Second La Mesa Fire Symposium*. – USDA Forest Service, 1996. – P. 11-32.
19. Taylor A.H., Skinner C.N. Fire History and Landscape Dynamics in a Late-Successional Reserve, Klamath Mountains, California, USA // *Forest Ecology and Management*. – 1998. – Vol. 111. – P. 285-301.
20. Locosselli G.M., Buckeridge M.S. Dendrobiochemistry, a missing link to further understand carbon allocation during growth and decline of trees // *Trees – Structure and Function*. – 2017. – Vol. 31. – P. 1745-1758. – DOI: 10.1007/s00468-017-1594-0.

21. Tyutkova E., Loskutov S., Dorzhiev D. Physical and chemical wood characteristics of healthy vs. suppressed Scots pine trees of Central Siberia // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2023. – Vol. 148. – P. 11743-11752. – DOI: 10.1007/s10973-023-12496-4.
22. Николаева С.А., Савчук Д.А., Кузнецов А.С., Тимошок Е.Е. Дендроиндикация прошлых пожаров в верховьях р. Актру (Горный Алтай) // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 221-243. – DOI: 10.17516/1997-1389-0384.
23. Sutherland E.K., Brown P.M., Falk D.A., Grissino-Mayer H.D., Velasquez E., Woodhouse C.A., Brewer P. Fire History Analysis and Exploration System. Version 2.0 [Электронный ресурс]. – Fire Research and Management Exchange System, FHAES Working Group, 2014. – URL: <http://www.frames.gov/partner-sites/fhaes/fhaes-home/> (дата обращения: 13.05.2026)
24. Grissino-Mayer H.D. Modeling fire interval data from the American Southwest with the Weibull distribution // *International Journal of Wildland Fire*. – 1999. – Vol. 9, No. 1. – P. 37-50.
25. Bigio E.R., Swetnam T.W., Baisan C.H. et al. The influence of land-use activities and regional drought on historical fire regimes of Buryatia, Siberia // *Environmental Research Letters*. – 2022. – Vol. 17, No. 1. – 054043. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac6964.
26. Kumar A., Wang L., Dzenis Y.A., Jones D.D., Hanna M.A. Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock // *Biomass and Bioenergy*. – 2008. – Vol. 32. – P. 460-467. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.11.004.
27. Gao M., Sun C., Zhu K. Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2004. – Vol. 75. – P. 221-232. – DOI: 10.1023/B:JTAN.0000017344.01189.e5.
28. Protásio T.P., Junior M.G., Mirmehdi S., Trugilho P.F., Napoli A., Knovack K.M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell // *Cerne*. – 2017. – Vol. 23, No. 1. – P. 1-10. – DOI: 10.1590/01047760201723012202.
29. Wotton B.M., Gould J.S., McCaw W.L., Cheney N.P., Taylor S.W. Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest // *International Journal of Wildland Fire*. – 2012. – Vol. 21, No. 3. – P. 270-281. – DOI: 10.1071/WF10127.
30. Shapchenkova O.A., Loskutov S.R., Kukavskaya E.A. Alteration of Organic Matter during Wildfires in the Forests of Southern Siberia // *Fire*. – 2023. – Vol. 6, No. 8. – Article 304. – DOI: 10.3390/fire6080304.

© С. В. Жила, Е. А. Артемихина, И. В. Фуряев, 2026